

Numerical investigation of energy dissipation and flow aeration on flat stepped spillways

Mehdi Shokri Kaveh¹, Farzin Salmasi^{2*} , Akram Abbaspour³

1. M.Sc. student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

In order to facilitate the release of floods from the dams and to prevent their damage or collapse, a structure called a spillway is used. Due to the natural and variable flow of the input to the reservoirs of the dams, there are times when the river inflow exceeds the consumption amount in the downstream agricultural lands. In these cases, excess water is discharged over the crest of the weir and flows towards the spillway, which causes high velocities. This high velocity creates low pressure areas on the spillway concrete surface, which can cause major damage to the spillway or even endanger the integrity of the dam structure. Therefore, the dam spillway must safely dissipate the kinetic energy. One of the types of weirs is the stepped spillway to facilitate the passage of the flow over the dams. One of the most obvious practical features of stepped spillways compared to other spillways is the considerable energy dissipation along the spillway. Care should be taken in designing and selecting the type of spillway to prevent potential erosion and reduce kinetic energy as the water flow passes over the spillway. One possible solution is to use a stepped spillway instead of a smooth spillway. In this study, a numeral model of a stepped spillway with different steps and slopes is used. For this purpose, ANSYS software is used for modeling free surface with application of k- ϵ turbulence model. In the present study, numerical simulation using the Volume of Fluid (VOF) model was used to investigate the mixing phenomenon of two phases of air and water of the free surface flow. The flow field was continued until the residuals reached 10^{-7} . Compared to simpler models such as Mixture, which operates solely on the basis of averaging the properties of two phases, the VOF model, is separating the phases and considering the effects of the interface. The VOF model, is capable of more accurate simulation of phenomena such as fluid mixing, turbulent flows, and heat transfer in multiphase flows. A number of hydraulic specifications which are considered in designing the stepped spillways are the pressure on the surface of the steps, velocity distribution and energy dissipation. The results from the numerical models were compared with experimental studies. They showed acceptable agreement with physical simulations. Results show that discharge and spillway slope increment reduces the amount of energy loss. In the spillway with 5 steps, for a discharge of $0.063 \text{ m}^3/\text{s}$, the amount of energy dissipation at a slope of 26.6 degrees changes from 85 to 82% at a slope of 45 degrees, which shows a decrease of 3%. With the increase in discharge, the flow depth increases and reduces the effect of the roughness of the steps on the upper layers of the flow. Increasing the height of the steps increases the rate of energy dissipation and also increases the occurrence of negative pressures in stepped spillway. In this case, the contact surface between the main flow and the eddy currents increases. With the increase in the height of the steps, the dimensions of the rotating vortices also increase and cause a larger radius of rotation on the steps. The presence of these large rotating vortices separates the flow from the bottom of the steps and reduces the pressure on the surfaces. The number and dimensions of steps can alter the energy dissipation rate. Increase in the number of steps in a spillway with constant height, reduces the energy loss as the result of steps dimensions being shrunk.

Review History

Received: Jul 18, 2024
Revised: Sep 25, 2024
Accepted: Nov 23, 2024

Keywords

ANSYS
energy dissipation
numeral simulation
stepped spillway
turbulence model
velocity distribution

* Corresponding Author Email: salmasi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-1627-8598



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه عددی استهلاک انرژی و هوادهی جریان روی سرریزهای پلکانی مسطح

مهدی شکری کاوه^۱، فرزین سلماسی^{۲*} ID، اکرم عباسپور^۱

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، گرایش سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

برای جلوگیری از فرسایش و کاهش انرژی جنبشی در هنگام عبور جریان از روی سرریز یک سد، باید در انتخاب نوع سرریز دقت لازم را بکار برد. یک راه حل ممکن، استفاده از سرریز پلکانی به جای سرریز صاف (بدون پله) است. سرریز پلکانی از جمله سازه‌های هیدرولیکی شناخته شده است که به دلیل داشتن سطح ناهموار، تاثیر زیادی بر استهلاک انرژی جریان دارد. در این تحقیق، مدل‌های عددی از سرریز پلکانی دارای شیب و پله‌های مختلف برای بررسی شرایط جریان مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی جریان روباز از نرم افزار ANSYS و مدل آشفتگی k-ε استفاده شد. میدان حل جریان تا رسیدن باقیمانده‌ها به مقدار 10^{-7} ادامه یافت. در تحقیق حاضر، برای بررسی دقیق پدیده اختلاط دو فاز آب و هوا و رفتار سطح آزاد جریان، از شبیه‌سازی عددی و با کاربرد مدل Volume of Fluid (VOF) استفاده شد. در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر مانند Mixture که صرفاً بر اساس میانگین‌گیری از خواص دو فاز عمل می‌کند، مدل VOF با تفکیک دقیق فازها و در نظر گرفتن آثار سطح مشترک، قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تری از پدیده‌هایی مانند اختلاط سیال‌ها، جریان‌های توربولانسی و انتقال حرارت در جریان‌های چندفازی است. بخشی از مشخصات هیدرولیکی که در طراحی سرریزهای پلکانی مدنظر قرار گرفت، شامل فشار روی سطوح پله‌ها، توزیع سرعت روی پله‌ها و استهلاک انرژی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با تعدادی از مدل‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و نتایج حاکی از هماهنگی قابل قبول مدل عددی با مدل‌های فیزیکی بود. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان و شیب سرریز، استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد. در سرریز ۵ پله‌ای به ازای دبی ۰/۰۶۳ متر مکعب بر ثانیه، مقدار استهلاک انرژی در شیب ۲۶/۶ درجه از ۸۵ درصد به مقدار ۸۲ درصد در شیب ۴۵ درجه رسیده که کاهش ۳ درصدی را نشان می‌دهد. در یک سرریز با ارتفاع ثابت، با افزایش تعداد پله، مقدار استهلاک انرژی به دلیل کوچک شدن ابعاد پله کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

استهلاک انرژی

شبیه‌سازی عددی

سرریز پلکانی

مدل تلاطم

توزیع سرعت

ANSYS

۱- مقدمه

اضافه‌ای از روی تاج سرریز تخلیه می‌شود که ممکن است سرعت‌های بالایی ایجاد کند و آسیب‌های جدی به سرریز یا ساختار سد وارد آورد. یکی از انواع سرریزها، سرریز پلکانی است که به طور خاص برای استهلاک انرژی جنبشی طراحی شده است

سرریزها، سازه‌هایی برای تسهیل رهاسازی سیلاب از روی سدها و جلوگیری از آسیب به آنها هستند. در مواقعی که دبی ورودی به مخازن سدها بیش از مصرف پایین‌دست است، آب

* رایانامه نویسنده مسئول: salmasi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-1627-8598

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



[1]. این سرریزها معمولاً دارای پله‌های افقی مسطح و ارتفاع یکنواخت هستند و به منظور تخلیه ایمن سیلاب و جلوگیری از فرسایش بدنه پایین دست در سازه‌های هیدرولیکی کاربرد دارند [2].

سرریزهای پلکانی همچنین در تصفیه‌خانه‌های آب برای بهبود کیفیت آب، مانند افزایش اکسیژن و حذف ترکیبات آلی، استفاده می‌شوند [3]. با طراحی پلکانی، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد که می‌تواند عمق حفاری حوضچه آرامش، طول و ارتفاع دیواره‌های جانبی را کاهش داده و صرفه‌جویی‌های اقتصادی قابل توجهی در ساخت سدها به همراه داشته باشد [4].

هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی به دلیل عبور جریان دو فازی آب-هوا و وجود پله‌ها، پیچیدگی‌های زیادی دارد و منجر به افزایش نرخ اتلاف انرژی می‌شود. یکی از ویژگی‌های بارز این سرریزها، فرآیند ورود و اختلاط هوا با آب در جریان است. حباب‌های هوا به دلیل نوسانات جریان و نزدیکی به سطح آزاد ایجاد می‌شوند؛ این هوا به طور مداوم حبس و سپس رها می‌شود، به طوری که وقتی انرژی جنبشی تلاطم افزایش یابد، قادر به غلبه بر کشش سطحی و نیروی ثقل می‌شود [5]. از اوایل دهه ۱۹۶۰، با توسعه ساخت سدها از مصالح بتن غلطکی فشرده (RCC) تکنولوژی جدید این مصالح و سرریزهای پلکانی توجه زیادی را جلب کرده است. سرریزهای پلکانی با این نوع مصالح سازگاری مناسبی دارند و بنابراین، این روش ساخت اهمیت بیشتری یافته است [6]. چانسون (۱۹۹۴) نشان داد که جریان‌های چرخشی با توجه به شیب سرریز، در رژیم غیرریزشی متفاوت هستند [7]. برای پله‌های مسطح، حفره‌های سیال چرخشی به شکل نازک و مستطیلی است و گردابه‌های بزرگ نمی‌توانند به طور کامل حفره را پر کنند. این گرداب‌ها ممکن است با الگوی جریان پله‌های بعدی تداخل ایجاد کنند. در این حالت، عوامل مؤثر در جریان شامل فاصله بین لبه‌های پله‌ها و عمق جریان هستند. جریان در ابتدا صاف و عاری از هوا است تا به نقطه‌ای به نام "نقطه شروع هواگیری" برسد. در پایین دست این نقطه، هوا از سطح آزاد به جریان متلاطم وارد می‌شود و به تدریج مقدار هوای بیشتری را به داخل جریان می‌افزاید؛ متوسط ورود هوا به جریان معمولاً بین ۳۰ تا ۶۰ درصد متغیر است. اگر اثر تراکم‌پذیری سیال دو فازی نادیده گرفته شود، می‌توان جریان را به عنوان یک سیال با چگالی متوسط

بررسی کرد [8]. در سرریزهای پلکانی، رشد لایه مرزی آشفته تا رسیدن به سطح آزاد ادامه می‌یابد و در این هنگام، آشفتگی‌ها می‌توانند هوادهی سطح جریان را آغاز کنند [7].

ANSYS یک نرم‌افزار پیشرفته است که امکان شبیه‌سازی مسائل مرتبط با دینامیک سیالات، مهندسی شیمی، هیدرودینامیک و دیگر زمینه‌های مهندسی را فراهم می‌کند. در این تحقیق، از ANSYS CFX به عنوان ابزاری برای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بهره گرفته می‌شود. CFD یک ابزار ریاضی است که حرکت سیال را از طریق حل معادلات غیرخطی و اعمال شرایط مرزی مشخص تحلیل می‌کند. دقت شبیه‌سازی‌های CFD به دقت عددی، هزینه محاسبات و کیفیت مدل‌سازی وابسته است.

ملک‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) مدل عددی را با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و روش المان محدود برای پیش‌بینی جریان سطح آزاد در سرریز لبه پهن مستطیلی مورد استفاده قرار دادند و از مدل $k-\epsilon$ برای تحلیل جریان آشفته بهره بردند [9]. ساویج و همکاران (۲۰۰۱) نیز یک مدل آزمایشگاهی با مشخصات هندسی سرریز اوجی استاندارد طراحی کردند که در آزمایشگاه یوتا ساخته شده و شامل تحلیل دبی و فشار می‌شود [10]. آن‌ها داده‌های مدل آزمایشگاهی، عددی و منحنی‌های استاندارد اداره احیای اراضی آمریکا و گروه مهندسی ارتش آمریکا را مقایسه کردند.

سرکریان و احدیان (۲۰۲۰) با استفاده از نرم‌افزار Ansys CFX، جریان روی سرریزهای پلکانی را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که تأثیر دبی بر استهلاک انرژی بیشتر از تأثیر شیب و تعداد پله‌ها است. با افزایش دبی، شیب سرریز و تعداد پله‌ها، تأثیرگذاری پله‌ها بر استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. آن مطالعه، نشان داد که مدل عددی CFX به لحاظ دقت نتایج و هزینه محاسبات می‌تواند جانشین مناسبی برای روش‌های آزمایشگاهی پرهزینه باشد [11]. ثاقب و همکاران (۲۰۲۲)، در بررسی مدل عددی جریان روی سرریزهای پلکانی، اتلاف انرژی و فشار را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که سرریزهای با پلکان منحنی در دبی‌های جریان پایین، سه درصد بیشتر از سرریزهای ساده انرژی اتلاف می‌کنند، اما در دبی‌های بالاتر اتلاف قابل توجهی نشان نمی‌دهند. سرریزهای ساده پلکانی، فشار منفی بیشتری دارند و در نتیجه مستعد کاویتاسیون هستند. آن‌ها بیان کردند که استفاده از سرریز با پلکان منحنی می‌تواند احتمال کاویتاسیون را کاهش دهد

[12]. فاروق و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه عددی به ارزیابی سرریزهای پله‌ای مسطح و حوضچه‌دار با استفاده از مدل $k-\epsilon$ turbulence پرداختند. چهار پیکربندی بررسی شد و رفتار جریان در سرعت‌های ۰/۴۵ تا ۰/۷ متر بر ثانیه تحلیل شد. نتایج نشان داد که سرریزهای حوضچه‌دار نسبت به سرریزهای مسطح در اتلاف انرژی عملکرد بهتری دارند. همچنین سرریزهای حوضچه‌دار به ویژه در جریان غیرریزشی، عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای مسطح دارند. آنها پیشنهاد کردند که نیاز به پژوهش‌های بیشتر در شرایط دبی بالا وجود دارد [13].

گوندر و همکاران (۲۰۱۳) چهار مدل مختلف سرریز پلکانی را بررسی کردند و میزان اختلاط هوا و افت انرژی را تحلیل نمودند [14]. نتایج آن‌ها نشان داد که کمترین افت انرژی در سرریز پلکانی با پله‌های افقی مشاهده شده است، در حالی که سرریزهای نیم آستانه‌دار، مزیت ویژه‌ای نسبت به نوع آستانه‌دار کامل نداشتند.

در طی چهل سال گذشته، تحقیقات متعددی روی جریان‌ات عبوری از تنداب‌های پلکانی انجام شده که شامل کارهای سورنسن [15]، پیراس و همکاران [16]، کریستودولو [17]، چمنی و راجاراتنام [18]، چینارسی و وانگ وایز [19] و سلماسی و صمدی [20] می‌باشد. با این حال، تنها در تعداد محدودی از مقالات به جریان‌ات کاملاً متلاطم با هوادهی سطحی قوی در تنداب‌های پلکانی پرداخته شده است [21].

الگوی جریان عبوری از تنداب پلکانی با هندسه معین، به صورت یکی از رژیم‌های ریزشی، انتقالی و یا غلتشی می‌باشد. نوع رژیم جریان تشکیل شده روی این سازه‌ها تابعی از دبی و هندسه پله‌ها است [22]. در دبی‌های پایین، جریان آب به صورت جت‌های ریزشی و در میان یک سری حوضچه‌های غوطه‌وری (Plunge Pool) از پله‌ای به پله دیگر روی تنداب پلکانی منتقل می‌شود که به این نوع الگوی جریان، در اصطلاح رژیم جریان ریزشی می‌گویند [23]. در دبی‌های نسبتاً متوسط، جریان بینابینی یا انتقالی مشاهده می‌شود که از مشخصه‌های بارز آن می‌توان به رفتار آشفته جریان، برخورد شدید جت آب به کف پله‌ها، پاشش قطرات آب به هوا در پایین دست نقطه شروع هوادهی و ایجاد ریزگردابه‌ها در زیر جت عبوری جریان در پله‌های انتهایی و تشکیل جریان استخری و وجود حفره هوا (Air Cavity) در پله‌های اولیه تنداب اشاره نمود. به عبارت دیگر در این نوع رژیم، الگوی جریان در

برخی از پله‌های بالادست به صورت نسبتاً ریزشی و در برخی از پله‌های پایین دست به صورت غلتشی مشاهده می‌شود. خط متصل‌کننده لبه خارجی پله‌ها که موازی شیب طولی تنداب است را می‌توان به عنوان خط کف مجازی (Pseudo Bottom) تنداب در نظر گرفت که در دبی‌های زیاد، جریان عبوری به صورت غلتش بر روی این خط به پایین دست تنداب منتقل می‌شود و به آن رژیم جریان غلتشی می‌گویند. جریان غلتشی شامل چرخابه‌های (Recirculation) قوی همراه با الگوهای گردابه‌ای سه بعدی می‌باشد [24]. همچنین در این نوع جریان، یکسری ریزگردابه (Eddies) در گوشه پله‌ها تولید می‌شود. برای به کمیت درآوردن رژیم جریان روی مدل فیزیکی سرریز پلکانی، بیشتر پژوهشگران از پارامترهای بی بعد d_c/h و h/l استفاده نموده اند که d_c معرف عمق بحرانی جریان و h و l به ترتیب ارتفاع و طول هریک از پله‌های سرریز است. پارامتر بی بعد h/l ، بیانگر شیب سرریز پلکانی است.

در این مطالعه، از نرم‌افزار Ansys cfx به دلیل سهولت استفاده و قابلیت‌های فراوان آن در حل و آنالیز جریان‌های مختلف، برای شبیه‌سازی جریان از روی یک سرریز پلکانی استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی مدل آشفتگی از مدل $k-\epsilon$ و برای بررسی اختلاط بین دو فاز آب - هوا و سطح آزاد جریان، از مدل Volume of Fluid (VOF) استفاده شده است. این مدل، به طور خاص برای شبیه‌سازی جریان‌هایی که دارای سطح مشترک متحرک بین دو سیال هستند، طراحی شده است. این مدل می‌تواند پدیده‌های سطحی مانند اختلاط هوا با جریان آب، موج‌ها و کاویتاسیون را با دقت بالا شبیه‌سازی کند. مدل VOF از چندین روش برای تفکیک فازها استفاده می‌کند. ۱- روش حجم سیال: در این روش یک تابع مشخصه برای هر سلول محاسباتی تعریف می‌شود که نشان دهنده نسبت حجم هر فاز در آن سلول است. ۲- روش سطح مشترک (Interface Tracking): در این روش، سطح مشترک بین دوفاز به صورت صریح ردیابی می‌شود. این روش معمولاً از تکنیک‌های شبکه‌بندی مجدد (Re-meshing) یا روش سطحی (Level Set) استفاده می‌کند تا مرز بین فازها را با دقت بالا مشخص کند. شبکه محاسباتی در این دو حالت به طور مداوم با تغییرات سطح مشترک به روزرسانی می‌شود.

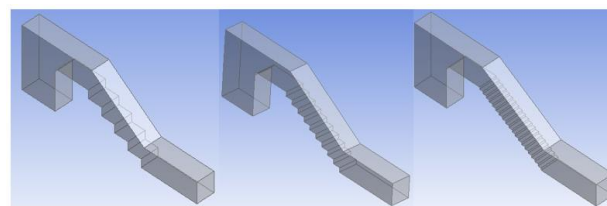
دقت بیشتر و هماهنگی با شرایط واقعی، شبیه‌سازی عددی به صورت سه بعدی در نرم افزار ANSYS انجام می‌شود. در شکل (۱)، ایجاد مدل هندسی سرریز پلکانی برای شیب ۲۶/۶ درجه ارائه شده است.

۱-۲- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

بعد از تولید هندسه مسئله مورد نظر، گام بعدی در انجام مدل‌سازی عددی این است که دامنه حل را به تعدادی حجم‌های محدود، گسسته‌سازی کرد. بدین منظور، ابتدا باید یک شبکه مناسب روی هندسه ایجاد شود. در حقیقت، شبکه ایجاد شده روی جواب نهایی تأثیر بسیار زیادی می‌گذارد. به شکلی که در این بخش به صورت آزمون و خطا مدل را با شبکه بندی از نوع مش با اندازه‌های مختلف اجرا نموده و بهترین اندازه مش را که نتایج با همگرایی بالا را بدنبال داشت به عنوان مش نهایی انتخاب شد. البته باید توجه داشت که علاوه بر همگرایی نتایج، مدت زمان اجرای مدل توسط نرم افزار نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. پس در هنگام انتخاب اندازه مش‌ها باید به هر دو مطلب همگرایی نتایج و مدت زمان اجرای نرم‌افزار توجه نمود. برای شبکه‌بندی دامنه حل، باید دید درستی نسبت به مسائل دینامیک سیالات داشت تا بتوان پیش‌بینی درستی از نواحی با گرادیان‌های زیاد، سرعت، فشار داشت و با توجه به گرادیان پارامترهای مختلف، تراکم شبکه در مناطق مختلف را تنظیم کرد.

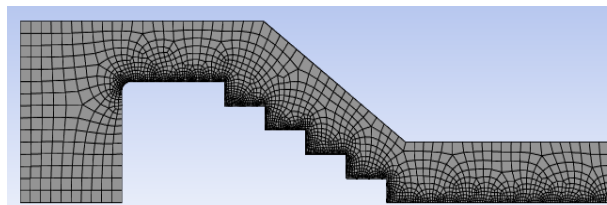
در این پژوهش، برای پلکان‌های سرریز که نوسانات سرعت و فشار وجود دارد، ابعاد مش‌ها کوچکتر انتخاب می‌شود. در سایر نقاط مدل، برای اینکه حجم معادلات عددی و زمان آنالیز مدل کاهش یابد، از مش‌هایی با ابعاد متوسط استفاده شد. به عنوان نمونه، در شکل (۲) قسمتی از شبکه‌بندی برای مدل هندسی از سرریز پلکانی ارائه شده است.

شناخت شرایط حاکم بر محیط دامنه حل، از جمله نکات مهم در مش‌بندی است. در مسئله حاضر با توجه به سطح آزاد جریان و حضور جریان دو فازی آب و هوا، مش بندی دامنه حل دارای تنوع گوناگونی از اندازه‌ها است. زیرا بخشی از دامنه حل که سیال در آن جریان دارد، با توجه به انجام مدل‌سازی برای جریان سیال و وجود تغییرات گرادیانی مختلف و آشفتگی‌ها و تشکیل گردابه‌های جریان در حد فاصل بین لبه‌های افقی و عمودی پله‌ها نیاز به مش



شکل ۱. مدل هندسی سرریز پلکانی برای شیب ۲۶/۶ درجه و تعداد پله‌های ۵، ۱۰ و ۲۰

Fig. 1. Geometrical model of the stepped spillway for the slope of 26.6 degrees and the number of steps 5, 10 and 20



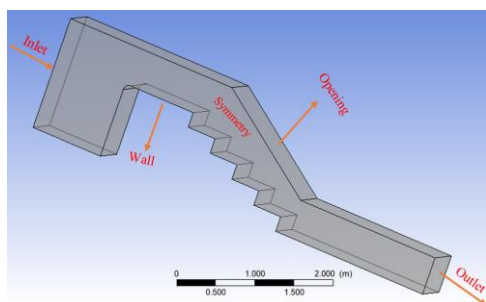
شکل ۲. مقطع طولی از سرریز پلکانی ۵ پله‌ای با شبکه بندی مدل هندسی

Fig. 2. Two-dimensional longitudinal cross-section of a 5-stepped spillway including geometric model elements

در تحقیق حاضر در مجموع، تعداد ۹ مدل سرریز پلکانی برای شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شد. این مدل‌ها دارای شیب ۲۶/۶، ۳۹/۳۱ و ۴۵ درجه با تعداد پله‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ انتخاب شدند. شبیه‌سازی عددی، به صورت سه بعدی و جریان غیرمماندار انجام می‌شود. تحلیل میدان فشار، غلظت هوای ورودی، میدان سرعت و استهلاك انرژی از اهداف این مطالعه است.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، از ابعاد سرریز پلکانی در تحقیق گوندرو همکاران [14] استفاده شد. شیب سرریز در مطالعه آنها ۲۶/۶ درجه و عرض سرریز ۰/۵۲ متر است. ارتفاع پله‌ها ۱۰ سانتی‌متر و طول پله‌ها ۲۰ سانتی‌متر است. پله‌ها از جنس چوب و دیواره‌ها از پلکسی گلاس شفاف برای دیدن واضح جریان ساخته شد. در مطالعه حاضر، علاوه بر شیب ۲۶/۶ درجه، از دو شیب دیگر ۳۹/۳۱ و ۴۵ درجه نیز برای شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود تا اثر شیب بر پارامترهای جریان شناخته شود. همچنین از تعداد پله‌های ۵ و ۲۰ نیز استفاده می‌شود تا اثر پله‌ها بر مشخصات جریان بررسی شود. در مجموع، تعداد ۹ مدل سرریز پلکانی برای شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شد. مدل‌ها برای دو دبی مختلف اجرا می‌شوند. عرض سرریز در تمام مدل‌ها ۰/۵۲ متر است و علت این انتخاب مقایسه نتایج با مدل فیزیکی است. برای حصول



شکل ۶. اعمال شرایط مرزی

Fig. 6. Specification of different boundary conditions

پارامتر انحراف یکی از معیارهای اصلی تعیین کیفیت شبکه است که باید هنگام تولید شبکه رعایت شود. محدود این پارامتر نیز بین ۰ تا ۱ متغیر است و هرچه مقدار این پارامتر به عدد صفر نزدیکتر باشد، مش از کیفیت بهتری برخوردار است. در این تحقیق، پارامتر انحراف دارای مقدار متوسط ۰/۱۳۴۸ است و در محدوده خوبی قرار دارد (شکل ۴).

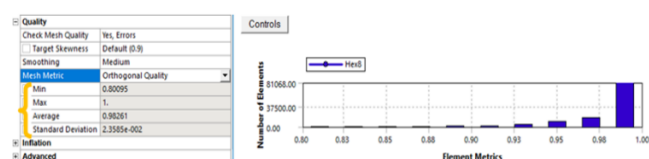
در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی به صورت سه بعدی انجام می‌گیرد و نحوه مش‌بندی سرریز پلکانی ۵ پله‌ای در CFX در شکل (۵) آورده شده است.

شرایط مرزی برای حوزه سیال در تمام سطوح اعمال شد. دبی جرمی در ورودی و فشار در مرز خروجی اعمال می‌شود. کف یا بستر به عنوان دیوارهای صاف با شرایط مرزی بدون لغزش تعریف شده اند. سطح بالایی به عنوان مرز باز با کشش و فشار نسبی صفر تعریف شده است، این تعریف شرایط جریان سطح آزاد را مشخص می‌کند. کناره‌ها به عنوان مرز تقارن برای کاهش محاسبات تعریف شد. شکل (۶) این شرایط مرزی را نشان می‌دهد.

۲-۲- معادلات حاکم بر جریان

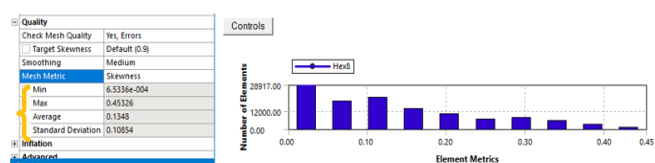
میدان سرعت نوسانی یکی از ویژگی‌های اصلی جریان‌های آشفته است. این نوسانات منجر به اختلاط مقادیر بردار منتقل شده مانند انرژی و تکانه می‌شود. معادلات حاکم آنی برای جدا کردن مقیاس‌های کوچک و به صورت میانگین زمانی محاسبه می‌شوند. در نتیجه، مجموعه‌ای از معادلات کم‌هزینه‌تر حاوی متغیرهای با مجهول کمتری به دست می‌آید. این متغیرهای ناشناخته (تلاطم) بر حسب متغیرهای مدل‌سازی شده در مدل‌های آشفته محاسبه می‌شوند. این روش میانگین‌گیری زمانی را میانگین‌گیری رینولدز

با اندازه کوچک‌تر نسبت به سایر نقاط دامنه حل دارد. در حالی که برای نقاط دورتر از ناحیه جریان سیال، به شبکه‌های بزرگتری نیاز است. برای تعیین کیفیت مش دو پارامتر متعامد بودن شبکه و انحراف شبکه مورد بررسی قرار گرفت. محدوده متعامد بین ۰ و ۱ متغیر است و توصیه می‌شود که این مقدار نزدیک به یک باشد. عدد یک نشان می‌دهد که زوایای سلول‌ها به ۹۰ درجه تمایل دارند و محاسبات را برای حل معادلات آسان می‌کند. در شکل (۳) میانگین مقدار معیار متعامد ۰/۹۸۲۶ است و مقدار مناسبی است.



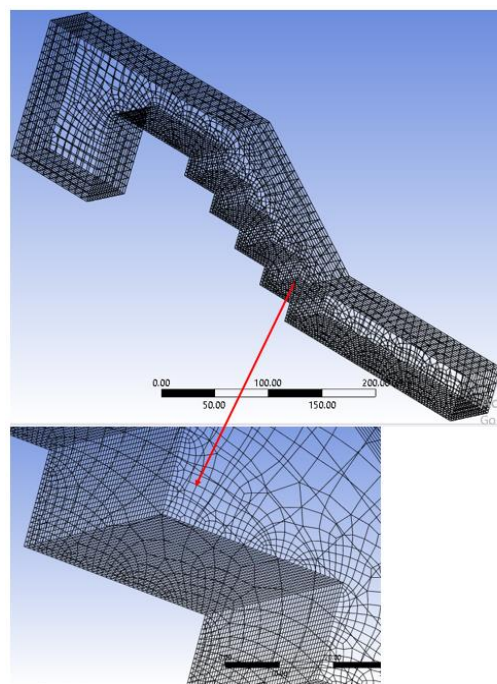
شکل ۳. معیار متعامد بودن شبکه در مدل‌های شبیه‌سازی شده در این تحقیق

Fig. 3. Criterion of mesh orthogonality in simulated models in this study



شکل ۴. معیار پارامتر انحراف شبکه در این تحقیق

Fig. 4. Criterion of mesh deviation parameter in this study



شکل ۵. چگونگی مش‌بندی سرریز پلکانی ۵ پله‌ای در CFX

Fig. 5. Meshing for a stepped spillway with a slope of 26.6 degrees and the number of step 5

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k - \rho \varepsilon$$

نرخ استهلاك و یسکوز انرژی جنبشی آشفته (ε)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon l} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

که در آن μ_t از رابطه زیر بدست می آید:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

و جایی که G_k تولید انرژی جنبشی آشفته است که:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

مقدار C_μ یک ثابت تجربی است و برابر ۰/۰۹ فرض می شود.

مدل چندفازی اتخاذ شده برای بررسی اندرکنش بین دو فاز

سیال (آب و هوا) مدل همگن VOF بود که یک مجموعه

معادلات حرکت را در دامنه حل کرده و حجم دو فاز را در هر

سلول به عنوان یک کسر ذخیره می کند در جریان سطح آزاد، برخی

از این سلول ها خالی هستند، برخی پر از مایع و برخی دیگر جزئی

اشغال شده اند. به همین دلیل، درصد اشغال بین ۰ تا ۱ توسط

پژوهشگران ارائه شده است (هیرت و نیکولز ۱۹۸۱ و نیک سرشت

و همکاران ۲۰۰۹). معادله (۸) برای تعریف درصد مایع در حجم ها

استفاده می شود:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial a_w}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

که در آن a_w کسر حجمی آب، t زمان و u_i سرعت در جهت

x_i است. مجموع کسره های حجمی آب و هوا برابر واحد است.

بنابراین کسر حجمی هوا (a_a) بصورت معادله (۹) محاسبه

می شود:

$$a_a = 1 - a_w \quad (9)$$

با توجه به معادله (۸)، اگر a_w برابر با ۱ باشد، نشان دهنده پر بودن

سلول از آب است، و اگر a_w برابر صفر باشد یعنی سلول پر از هوا

است. برای $0 < a_w < 1$ درصدی از سلول آب و درصدی از آن هوا

است. با حل معادله ۱ برای جزء حجمی آب (a_w)، جزء حجمی در

کل میدان حل تعیین می شود.

می گویند. وقتی این کار تکمیل شد، متغیرهای حل در معادله ناویر

استوکس به اجزای میانگین (میانگین زمان) و مولفه های نوسان

(تجزیه رینولدز) تقسیم می شوند. برای مولفه های سرعت، سرعت

کل به صورت زیر نوشته می شود:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (10)$$

که در آن $(\bar{u}_i)$ و (u'_i) به ترتیب مولفه های متوسط و سرعت

هستند.

رایج ترین معادلات مورد استفاده در CFD معادلات رینولدز

میانگین ناویر استوکس هستند که به صورت مجموعه ای از دو

معادله یعنی معادله پیوستگی و معادله تکانه بیان می شود.

• معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (12)$$

• معادله مومنتم

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \quad (13)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}$$

در معادلات فوق، u_i مولفه سرعت در جهت x ، u_j مولفه

سرعت در جهت y ، P' فشار اصلاح شده، P فشار، k کارمایه

جنبشی آشفته گی، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی و جملات

$-\rho \overline{u'_i u'_j}$ به عنوان تنش رینولدز شناخته می شوند.

مدل $k - \varepsilon$ ، معروف ترین مدل دو معادله ای می باشد. چرا که

یک مدل نیمه تجربی قدرتمند، به صرفه و با دقت کافی برای بازه

وسعی از جریان های آشفته است و از این لحاظ به مدلی بسیار

پرطرفدار در شبیه سازی های جریان و انتقال حرارت تبدیل شده

است. در این مدل، از دو متغیر برای توصیف آشفته گی میدان جریان

استفاده می شود:

• انرژی جنبشی جریان آشفته (k)

• نرخ استهلاك ویسکوز انرژی جنبشی آشفته (ε)

k انرژی جنبشی آشفته است که به عنوان واریانس نوسانات

سرعت تعریف می شود و دارای واحد ابعادی $L^2 T^{-2}$ است و ε

استهلاك ادی آشفته گی است و دارای واحد ابعادی $L^2 T^{-3}$ است.

این مقادیر از معادلات زیر به دست می آیند:

انرژی جنبشی آشفته گی (k)

باقیمانده معادلات را کاهش دهد. میدان حل جریان تا رسیدن باقیمانده‌ها به مقدار 10^{-7} ادامه یافته است.

برای محاسبه افت انرژی سرریز، از معادلات (۱۰ تا ۱۲) استفاده می‌شود. در این معادلات، H_{spillway} ارتفاع سرریز، y_0 عمق آب روی تاج سرریز، V_0 سرعت نزدیک شونده، g شتاب ثقل، y_1 عمق آب در پایین‌دست سرریز، E_0 انرژی روی تاج سرریز، E_1 انرژی در پایین‌دست سرریز و ΔE افت انرژی بین دو مقطع روی تاج سرریز و مقطع قبل از پرش هیدرولیکی است. در شکل (۸)، جزئیات عوامل هندسی سرریز پلکانی، به همراه رشد لایه مرزی و نقطه ورود هوا نشان داده شده است تا درک بهتری از هیدرولیک جریان صورت پذیرد.

$$E_0 = H_{\text{spillway}} + y_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (10)$$

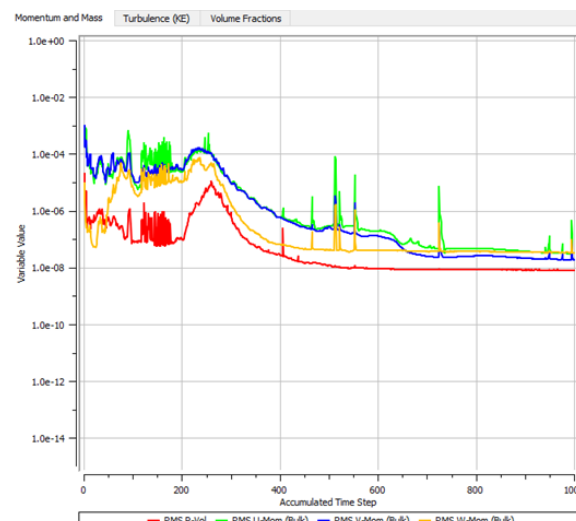
$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} \times 100 = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100 \quad (12)$$

۳- نتایج و بحث

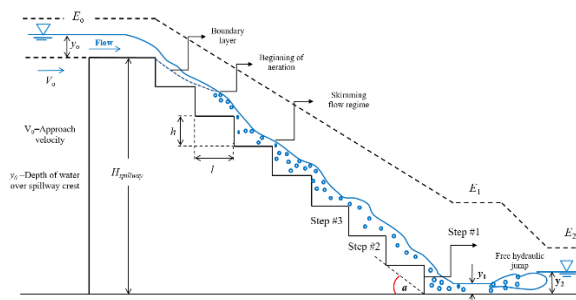
در این تحقیق مجموعاً نه سرریز در سه زاویه متفاوت $26/6^\circ$ ، $39/31^\circ$ و 45° با سه تعداد پله متفاوت ۵، ۱۰ و ۲۰ پله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای هر یک از این نه هندسه، دو دبی جرمی متفاوت سیال به عنوان شرط مرزی ورودی در نظر گرفته شده است.

خطوط کسر حجمی در یک سرریز پلکانی به تجسم توزیع مخلوط هوا و آب در جریان روی سرریز اشاره دارد. کسر حجمی نسبت حجم هوا به حجم کل آب و هوا در جریان است. این اطلاعات می‌تواند برای بهینه‌سازی طراحی سرریز به منظور بهبود کارایی و اثربخشی آن در اتلاف انرژی یا کاهش فرسایش ناشی از آن استفاده شود. خطوط دو فاز مجزا، یعنی آب با حجم کسری یک، هوا به عنوان صفر، و مخلوطی با کسر حجمی بین صفر و یک می‌باشد. هوادهی در سرریزهای پلکانی، هم در رژیم جریان ریزشی و هم غیر ریزشی اتفاق می‌افتد. در حالی که سازوکار هوادهی در این دو رژیم جریان متفاوت است (شکل ۹). در جریان ریزشی، هوادهی به دلیل تلاطم تولید شده در نقطه برخورد ریزش تیغه آب بر کف پله ایجاد می‌شود، در حالی که در جریان غیرریزشی، هوادهی زمانی شروع می‌شود که تلاطم در لایه مرزی در سطح آزاد پدیدار می‌شود.



شکل ۷. روند تغییرات حل معادلات اندازه حرکت و جرم نسبت به زمان

Fig. 7. Changes in the solution of the equations of momentum and mass vs. time



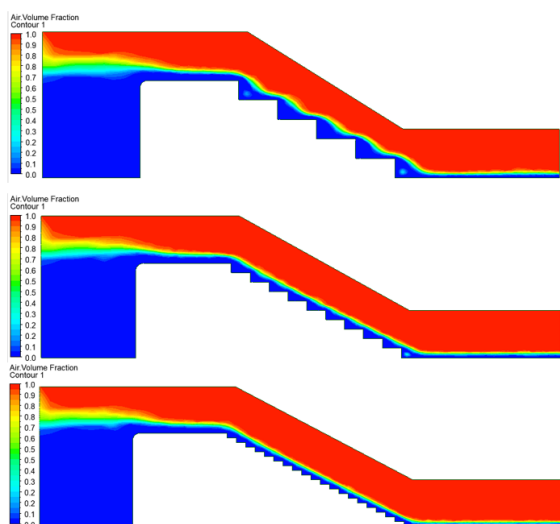
شکل ۸. عوامل هندسی در سرریز پلکانی، به همراه رشد لایه مرزی و نقطه ورود هوا

Fig. 8. Geometrical factors in stepped spillway, along with boundary layer growth and air entry point

این معادلات با استفاده از روش‌های گسسته‌سازی مانند روش حجم محدود (FVM) به صورت عددی حل می‌شوند. راه حل با تقسیم دامنه محاسباتی به سلول‌های کوچک و حل معادلات هر سلول به دست می‌آید. پاسخ‌ها سپس به‌طور مکرر به‌روزرسانی می‌شوند تا همگرایی حاصل شود. علاوه بر معادلات ناویر-استوکس، معادلات دیگر، مانند مدل‌های آشفتگی و سرعت واکنش ممکن است بسته به مسئله خاص مورد مطالعه در شبیه‌سازی‌های CFD گنجانده شوند.

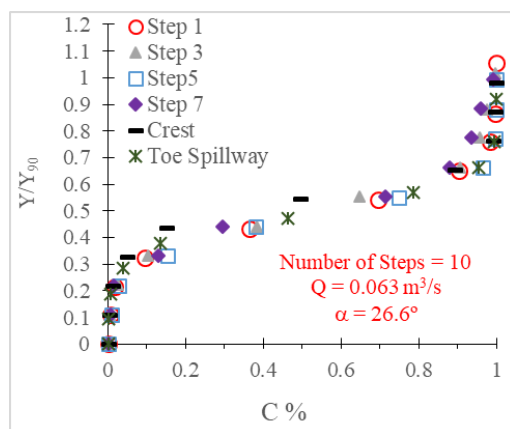
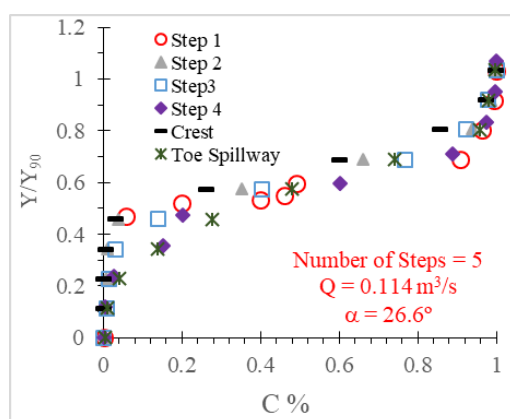
در شکل (۷) روند تغییرات حل معادلات اندازه حرکت و جرم (Momentum and Mass) نسبت به زمان ارائه شده است. در این تحقیق، مدت زمان تعیین شده برای شبیه‌سازی، ۴۰ ثانیه با گام‌های زمانی ۰/۰۴ در نظر گرفته شد. کنترل همگرایی حداکثر بین ۱ تا ۱۰ تکرار برای هر مرحله زمانی تعیین شده است تا مقادیر

باعث تلاطم جریان و ورود هوا به جریان می‌شود. این ورود هوا،



شکل ۹. کانتور کسر حجمی هوا در سرریز ۵، ۱۰ و ۲۰ پله ای با دبی ۰/۰۶۳ متر مکعب بر ثانیه در شیب ۲۶/۶ درجه.

Fig. 9. Air volume fraction contour in 5, 10 and 20-step spillway with a flow rate of 0.063 m³/s at a slope of 26.6 degrees



شکل ۱۰. توزیع غلظت هوا در سرریزهای پلکانی مختلف با زاویه ۲۶/۶ در دو دبی ۰/۰۶۳ و ۰/۱۱۴ متر مکعب بر ثانیه.

Fig. 10. Distribution of air concentration in different stepped spillways with an angle of 26.6 at two flow rates of 0.063 and 0.114 m³/s

ویژگی‌های جریان هوا-آب برای همه مدل‌های سرریزهای پلکانی در شبیه‌سازی حاضر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با فرض اطمینان از توسعه کامل جریان آب، غلظت هوا در موارد مختلف اساساً یکسان بود. توزیع غلظت هوا برای زاویه ۲۶/۶ درجه برای دو دبی مختلف با تعداد پله‌های متفاوت در شکل (۱۰) نشان داده شده است (برای اختصار، فقط برخی از شکل‌ها آورده شده است). تغییرات غلظت هوا در مخلوط هوا و آب با عدد بدون بعد y/y_{90} رسم شد که در آن y فاصله عمودی اندازه‌گیری شده از لبه هر پله در سرریز پلکانی تا سطح جریان است و y_{90} همانطور که توسط نورانی و همکاران [25] معرفی شد، عمق مشخصه‌ای است که در آن غلظت هوا ۹۰ درصد است.

با افزایش پارامتر بی بعد y/y_{90} غلظت هوا افزایش یافت. هنگامی که y/y_{90} بین ۰/۲ تا ۰/۴ است، غلظت هوا به سرعت افزایش یافته و به ۹۰٪ افزایش یافت. زیرا تلاطم شدید آب مقدار زیادی هوا ایجاد کرده و با ورود هوا به جریان سطح ویژه جریان افزایش یافت. راندمان هوا دهی با افزایش سطح تماس بین آب و هوا به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. هنگامی که y به سطح جریان آب نزدیک می‌شود، غلظت هوا به آرامی افزایش یافت، زیرا غلظت هوا در سطح، نزدیک به حد بالا بود بنابراین محتوای هوا به آرامی افزایش یافته است.

نتایج مشاهدات جریان هوا-آب شبیه‌سازی شده با مطالعه تجربی روی جریان آب-هوا انجام شده توسط گوند و همکاران [14] مقایسه شد (شکل ۱۱). نتایج حاصل رضایت بخش بود و بیشترین خطا ۴/۲۸ درصد بود. برای تعیین خطا از معادله زیر استفاده شد.

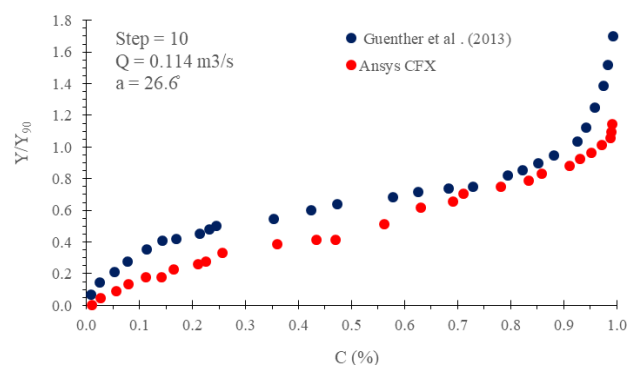
$$\text{Error} = \frac{Air_{\text{Experimental}} - Air_{\text{Numerical}}}{Air_{\text{Experimental}}} \quad (13)$$

در این تحقیق، عدم لحاظ ورود هوا به داخل سیال بر نتایج به ویژه استهلاك انرژی بررسی نشده و تمام شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن اختلاط هوا و آب انجام گرفت. چیزی که در واقعیت رخ می‌دهد، ورود مقادیر زیادی هوا به درون جریان از روی سرریزهای پلکانی است. در سرریزها سرعت زیاد آب باعث تلاطم جریان می‌شود و نتیجه این تلاطم ورود مقدار زیادی هوا به جریان است. سرعت زیاد جریان، زمانی حاصل می‌شود که شیب سرریز تند باشد. با افزایش شیب سرریز، سرعت جریان نیز بیشتر شده و

آن با آب، مقداری از استهلاك انرژی می‌کاهد. دلیل آن این است که وزن مخصوص هوا ۱۰۰ بار کمتر از آب است و ورود هوا مانند بالشتکی در آب عمل کرده و از تنش برشی بین لایه‌های آب کم می‌کند. هر چند این کاهش افت انرژی، در مقایسه با افت انرژی زبری‌های پله‌ها ناچیز است و به هر حال سرریز پلکانی سازه‌ای مهم در افزایش افت انرژی شناخته شده است.

برای نشان دادن این مسئله، سلماسی و آبراهام [26] به دو روش افت انرژی را اندازه‌گیری کردند. در روش اول عمق جریان قبل از پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شد که این عمق مملو از حباب‌های هوا بود. زیرا در نزدیکی پنجه سرریز قرار داشت و ورود هوا در پله‌های بالایی به وضوح در این مقطع از جریان قابل دیدن بود. در روش دوم، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه اعماق مزدوج، عمق قبل از پرش محاسبه شد. در این روش عمق بدون هوادهی بدست آمد و برای محاسبه افت انرژی بکار برده شد. علت این است که عمق ثانویه پرش هیدرولیکی مکانی است در پایین دست سرریز که جریان آرام‌تر شده، جریان زیر بحرانی است و حباب‌های هوا درون آب ناپدید شده‌اند. نتایج نشان داد که کاربرد مستقیم عمق قبل از پرش هیدرولیکی میزان افت انرژی بیشتری را نشان می‌دهد. با افزایش دبی جریان، تفاوت بین افت انرژی جریان با استفاده از عمق قبل و بعد از پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد (حدود ۱۹/۵ درصد در حداکثر جریان).

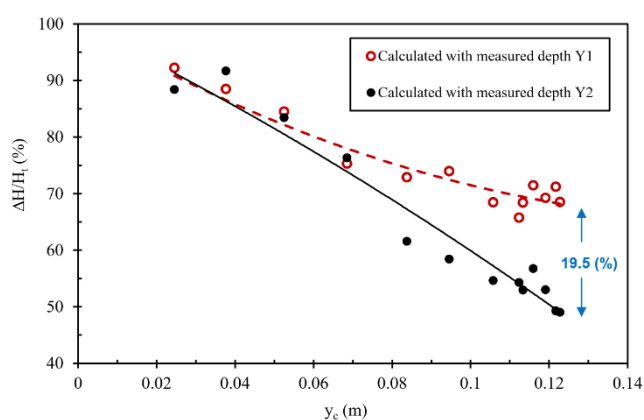
در شکل (۱۳) نتایج شبیه‌سازی عددی برای بررسی تغییرات فشار برای سرریز پلکانی با ۵ پله با دبی ۰/۰۶۳ و ۰/۱۱۴ مترمکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. شش مقطع عمودی برای بررسی تغییرات فشار انتخاب شد که به ترتیب از پایین دست به بالادست سرریز عبارتند از: مقطع روی کف حوضچه آرامش، مقطع روی وسط پله اول، دوم، سوم، چهارم و مقطع روی تاج سرریز (پله پنجم). در این شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی فشار علاوه بر مرکز پله‌ها، در دو جهت طولی دیگر، لبه بیرونی و لبه داخلی نیز مورد بررسی قرار گرفت. چگونگی توزیع فشار در قسمت‌های مختلف سرریز برای سرریز ۵ پلکانی در شکل (۱۳) آورده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین فشار در مرکز پله‌ها و متمایل به لبه‌ها رخ می‌دهد و کمترین فشار در لبه‌های داخلی اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی دقیق نحوه توزیع



شکل ۱۱. مقایسه هوادهی جریان در مدل عددی شبیه‌سازی شده با مدل

آزمایشگاهی گوندر و همکاران [14]

Fig. 11. Comparison of flow aeration in the simulated numerical model with the laboratory model of Gunder et al. [11]

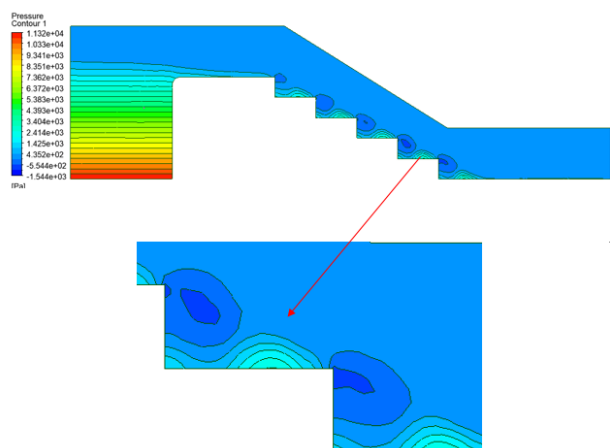


شکل ۱۲. تاثیر ورود هوا بر افت انرژی نسبی در سرریز پلکانی

Fig. 12. Effect of air entrainment on relative energy dissipation in stepped spillway

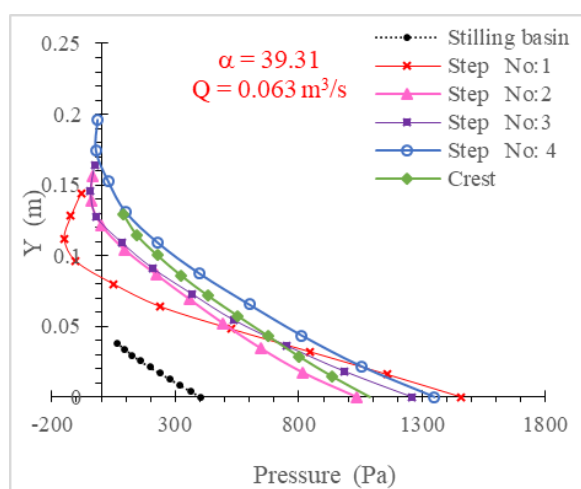
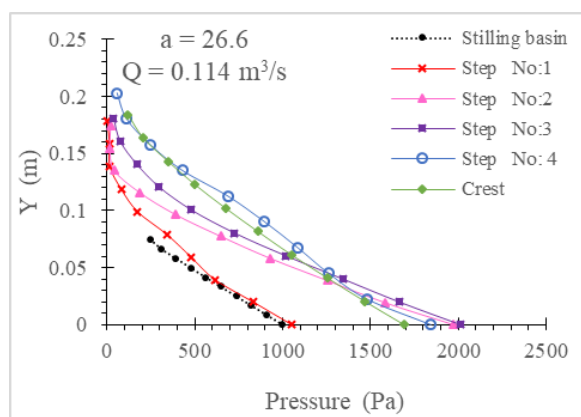
باعث کاهش استهلاك انرژی در سرریزها می‌شود. این پدیده در نتایج این تحقیق هم مشاهده شد. به بیان دیگر، با افزایش شیب سرریز، سرعت جریان افزایش یافته و باعث تلاطم جریان روی پله‌های سرریز و ورود مقدار زیادی هوا به جریان شد. در نتیجه مقدار استهلاك انرژی کاهش یافت. برای بررسی دقیق‌تر تاثیر ورود هوا در اندازه‌گیری افت انرژی نسبی و میزان خطای به دست آمده، می‌توان به تحقیق سلماسی و آبراهام [26] اشاره کرد. آنها برای نشان دادن خطای حاصل از اندازه‌گیری عمق جریان هوادهی شده و نشده در تعیین افت انرژی، مدل‌های فیزیکی مختلفی از سرریزهای پلکانی را ساختند. مقدار افت انرژی نسبی با کاربرد دو روش استفاده از عمق اندازه‌گیری شده قبل از پرش هیدرولیکی و استفاده از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این آزمایش‌ها برای سرریز با ۵ پلکان ارائه شده است. سلماسی و آبراهام [26] اشاره می‌کنند که ورود هوا و اختلاط

بیشترین سرعت‌ها در مرکز سطوح پله‌ها اتفاق افتاد. نتایج توزیع سرعت بسته به نوع جریان روی سرریزها الگوهای متفاوتی را نشان داد. به طوری که توزیع سرعت از کف پله‌ها شروع شده، ابتدا به دلیل شرط عدم لغزش روی دیواره کف پله، سرعت صفر



شکل ۱۳. توزیع فشار روی سطوح پله‌ها

Fig. 13. Pressure distribution on the surfaces of the steps



شکل ۱۴. فشار استاتیکی در مرکز سطوح پله‌ها با شیب‌های متفاوت

Fig. 14. Static pressure in the center of the surfaces of the steps with different slopes

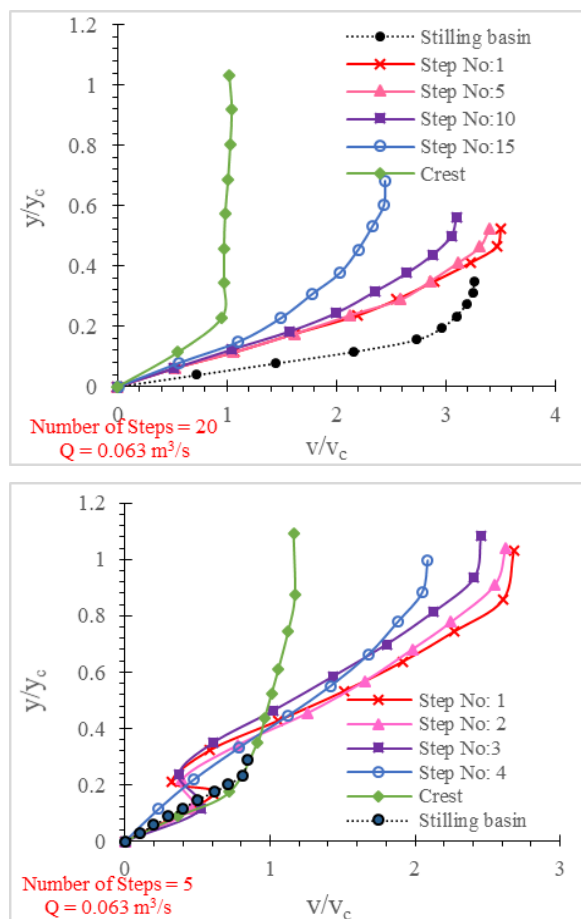
فشار بر روی پله‌ها، توزیع فشار بر روی پله اول از نمایی نزدیک در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با دقت در شکل بزرگ شده از پله اول مشاهده می‌شود که فشار جریان در لبه داخلی دارای فشار منفی است. علت آن، سرعت زیاد گردابه‌ها در این نواحی است. تغییرات فشار در لبه داخلی به علت وجود جریان‌های چرخشی است که باعث حرکت جریان آب به سمت دیواره پله شده، جریان با برخورد به دیواره پله به سمت بالا مماس بر پله حرکت کرده و از این رو، مقدار فشار کاهش می‌یابد. به طوری که برای سرریز موجود و در لبه داخلی پله اول، فشار از فاصله ۰/۱۰۱ تا فاصله ۰/۲۳ متر از کف پله دچار نوسان می‌شود، و بیشترین فشار منفی در فاصله ۰/۱۷۷ متر از کف پله اتفاق می‌افتد.

نتایج تغییرات فشار استاتیک و فشار کل برای سرریز ۵ پلکانی به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است. در این شکل‌ها، ۳ شیب سرریز ۲۶/۶، ۳۹/۳۱ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. قابل ذکر است که فشار کل، حاصل جمع فشار استاتیک به علاوه فشار دینامیکی ناشی از سرعت سیال است. فشار استاتیک با افزایش عمق جریان از سطح آب تا کف پله، روند افزایشی دارد ولی فشار کل، با افزایش عمق جریان، روند افزایشی-نزولی نشان می‌دهد که ناشی از تغییرات سرعت جریان است. شایان ذکر است که برای اختصار، فقط برخی از شکل‌ها ارائه شده اند.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی، فشار در مرکز پله‌ها افزایش می‌یابد. اما در فشار استاتیکی همانطور که در نمودارها نشان داده شده با افزایش شیب، فشار روی پله‌ها کاهش می‌یابد و حتی در برخی از پله‌ها فشار به سمت فشار منفی پیش می‌رود. علت این است که با افزایش شیب، سرعت جریان افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان، سرعت گردابه‌های ایجاد شده روی پله‌ها نیز افزایش می‌یابد و باعث جدایش جریان شده و فشار منفی اتفاق می‌افتد که با فاصله گرفتن از این نقاط و کاهش تأثیر جدایش جریان، فشار در سطح آزاد جریان به مقدار صفر می‌رسد. بنابراین احتمال کاویتاسیون در اثر افزایش شیب سرریز وجود دارد.

۳-۱- توزیع سرعت

تغییرات سرعت روی سرریز پلکانی و بر روی کف پله‌ها در سه نقطه (لبه داخلی، مرکز و لبه بیرونی) مورد بررسی قرار گرفت. توزیع سرعت جریان برای همه مدل‌ها روی پله‌ها بررسی شد و



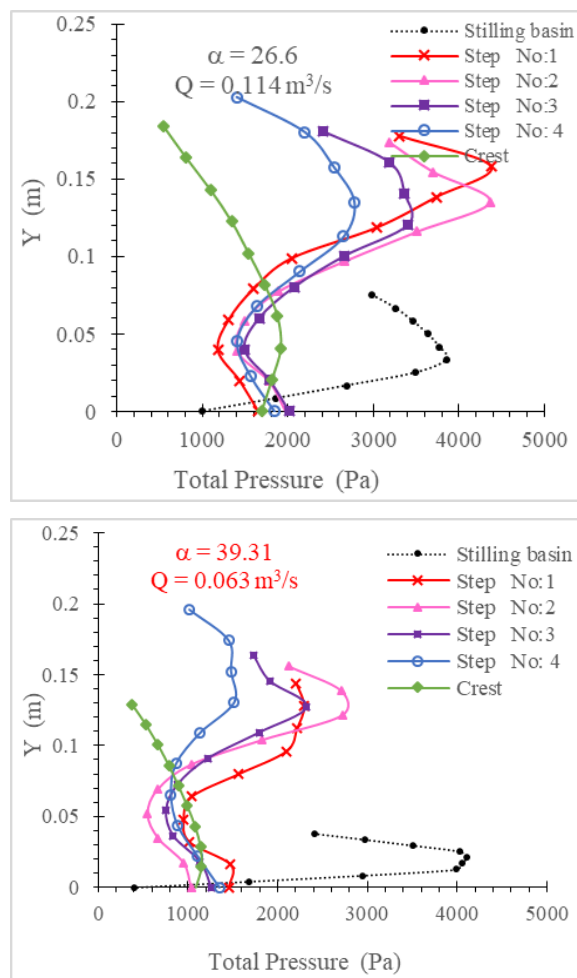
شکل ۱۶. توزیع سرعت برای رژیم‌های متفاوت جریان با دبی ۰/۰۶۳ متر مکعب بر ثانیه

Fig. 16. Velocity distribution for different flow regimes with a flow rate of 0.063 m³/s

هیچ نوسانی در توزیع سرعت‌ها وجود نداشت. شکل (۱۶) توزیع سرعت را برای جریان‌های مختلف نشان می‌دهد.

۲-۳- استهلاك انرژی

میزان استهلاك انرژی تحت تاثیر پارامترهای هندسی مانند ارتفاع سرریز، ارتفاع پلکان‌ها، شیب سرریز، تعداد پله‌ها و همچنین پارامترهای هیدرولیکی جریان هم چون دبی می‌باشد. بعضی مواقع با توجه به شرایط محیط طرح و لزوم پروژه می‌توان در یک شیب مشخص از سرریز پلکانی، ترکیب متفاوتی از تعداد پلکان اجراء نمود. پس بررسی در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد. از این رو مطالعه افت انرژی برای سرریز با سه شیب ۲۶/۶، ۳۹/۳۱ و ۴۵ درجه و ترکیب‌های متفاوت از تعداد ۵، ۱۰ و ۲۰ پله برای مقایسه و بررسی برای دو دبی ۰/۱۱۴ و ۰/۰۶۳ متر مکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت.

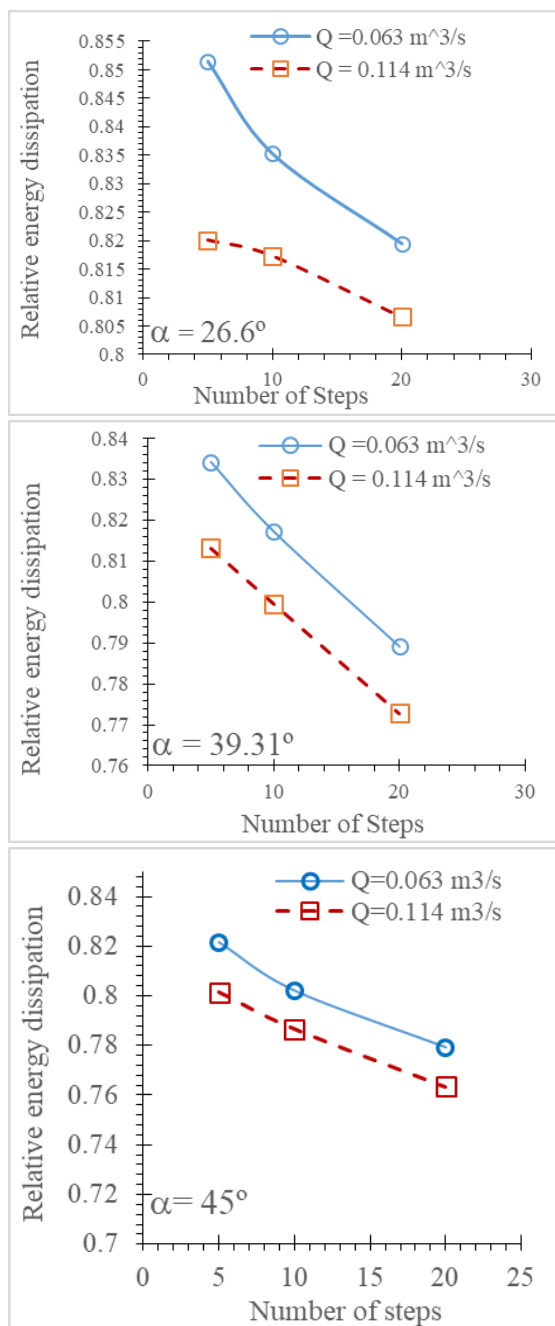


شکل ۱۵. فشار کل در مرکز سطوح پله‌ها با شیب‌های متفاوت

Fig. 15. Total pressure in the center of the step surfaces with different slopes

است، و در ادامه با فاصله گرفتن از سطح پله، سرعت به دلیل اندازه حرکت ناشی از حرکت آب افزایش می‌یابد تا به بیشترین مقدار خود برسد. در ادامه، با فاصله بیشتر از کف پله، سرعت سیال به دلیل نیروی بازدارنده بین آب و هوا کاهش می‌یابد. به طور کلی سرعت حرکت هوا از آب کمتر است، و با فاصله بیشتر از پله، به دلیل اختلاط هوا با آب، سرعت کاهش می‌یابد. چون مخلوط آب و هوا، سرعت کمتری نسبت به آب خالص دارد. برای جریان‌های ریزشی و جریان‌های انتفالی الگوهای توزیع سرعت بر روی پله‌ها تقریباً مشابه بود. در این جریان‌ها توزیع سرعت روی برخی از پله‌ها مقداری تغییر در قانون نیرو را با نوسانات کوچکی در $y/y_c < 0.2$ نشان دادند.

در همه مدل‌ها سرعت جریان در مرکز سطوح و در پله‌های پایین‌دست نسبت به پله‌های بالادست بیشتر بود و این سرعت متناسب با دبی یا شیب افزایش می‌یابد. در جریان‌های غیر ریزشی



شکل ۱۷. تاثیر تعداد پله بر استهلاک انرژی

Fig. 17. The effect of steps number on energy dissipation

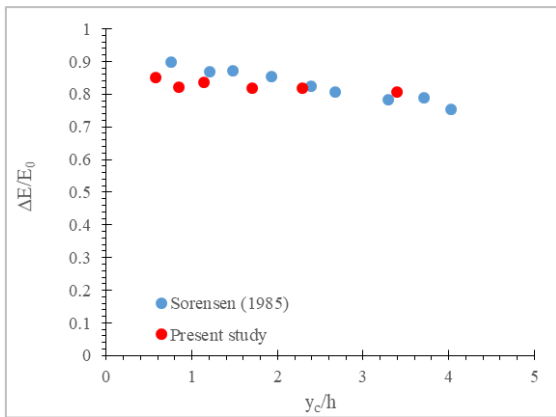
در شکل (۲۰)، مقایسه بین نتایج تحقیق حاضر با مطالعات انجام شده توسط مرو و میچل [27] و گوندرو و همکاران [14] ارائه شده است. اطلاعات موجود از دو پارامتر بی بعد $\frac{V_c}{h}$ و $\frac{E_1}{y_c}$ برای این مقایسه استفاده شد. ملاحظه می‌شود که افت انرژی نسبی در تحقیق آزمایشگاهی مرو و میچل [27] برای چهار نقطه بیشتر از افت انرژی نسبی در تحقیق حاضر است. بازه تحقیق مرو و میچل ۲ الی ۱۲ لیتر بر ثانیه بوده که نسبت به دبی تحقیق حاضر کمتر است که می‌تواند دلیل بیشتر بودن استهلاک انرژی نسبی باشد. زیرا

تغییرات استهلاک انرژی به ازای تغییرات دبی در سرریز ۵ پلکانی در شیب ۲۶/۶ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دبی، استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. بطوری که زمانی که دبی برابر با ۰/۰۶۳ متر مکعب بر ثانیه است مقدار استهلاک انرژی ۸۵/۱۵ درصد بوده، و زمانی که مقدار دبی ۰/۱۱۴ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، این مقدار برابر با ۸۲ درصد بوده است. این علت را می‌توان این گونه بیان کرد که عامل اصلی استهلاک انرژی در طول سرریزهای پلکانی، شکل پله‌ها و زبری مصنوعی ایجاد شده در زیر جریان می‌باشد. حال آنکه افزایش دبی موجب افزایش عمق جریان شده و از این لحاظ باعث کاهش آثار زبری در خصوص لایه‌های روی جریان می‌شود. از این رو افزایش دبی را می‌توان به عنوان عامل منفی در خصوص نرخ استهلاک انرژی عنوان نمود.

در شکل (۱۷) افزایش تعداد پلکان‌ها در یک دبی و شیب ثابت، موجب کاهش مقدار استهلاک انرژی می‌شود. نرخ استهلاک انرژی در سرریز پنج پلکانی مقدار ۸۵/۱۵ درصد است که با دو برابر کردن تعداد پله، مقدار استهلاک انرژی دو درصد کاهش یافته و با چهار برابر کردن تعداد پله، مقدار استهلاک انرژی چهار درصد کاهش می‌یابد.

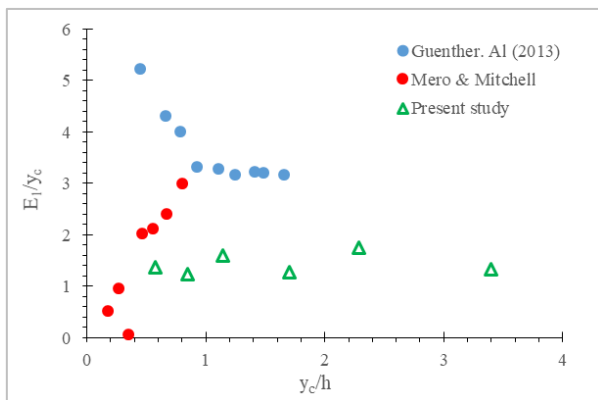
در شکل (۱۸) ملاحظه می‌شود با افزایش شیب، مقدار استهلاک نسبی کاهش یافته است. به طوری که در سرریز پنج پلکانی به ازای دبی ۰/۰۶۳ متر مکعب بر ثانیه، مقدار استهلاک انرژی در شیب ۲۶/۶ درجه از ۸۵/۱۵ درصد به مقدار ۸۲/۱۶ درصد در شیب ۴۵ درجه رسیده که کاهش ۳/۷ درصدی را نشان می‌دهد. این به این دلیل می‌باشد که در یک سرریز با ارتفاع ثابت، با افزایش شیب، طول پله‌ها کاهش یافته و این باعث می‌شود که اندازه گردابه‌های چرخشی کوچکتر شده و تاثیر کمتری بر جریان روی سرریز داشته باشند.

برای بررسی مدل عددی، نتایج استهلاک انرژی در تحقیق حاضر با نتایج چند مدل آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج در شکل‌های (۱۹ و ۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، نتایج سرریز شبیه‌سازی شده در مدل عددی از روند کلی نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط سورنسن [15]، پیروی می‌کند. بیشترین میزان اختلاف موجود به میزان ۸ درصد می‌باشد که قابل قبول بوده و هماهنگی مناسبی میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی سورنسن [15] وجود دارد.



شکل ۱۹. مقایسه تغییرات استهلاك نسبی در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

Fig. 19. Comparison of relative energy loss changes in the numerical model with the laboratory model



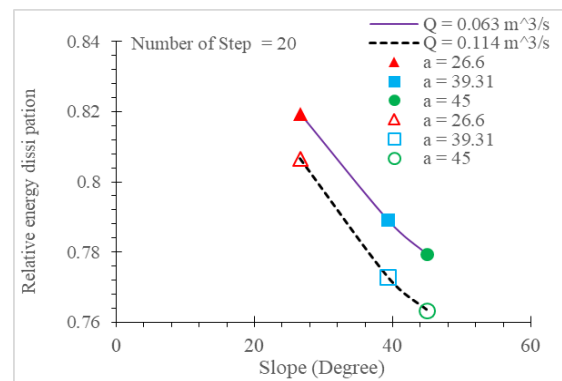
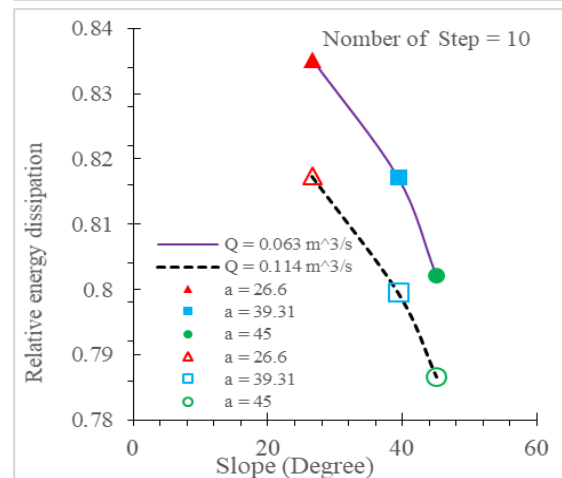
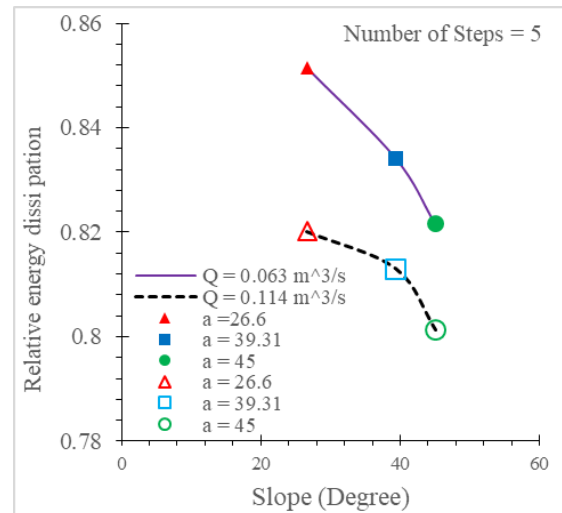
شکل ۲۰. مقایسه تغییرات استهلاك انرژی (E_1/y_c) بدست آمده مدل عددی با مدل‌های آزمایشگاهی

Fig. 20. Comparison of relative energy loss (E_1/y_c) with other studies

تأثیر داشته باشد. در ضمن، روند افزایش افت انرژی نسبی نسبت به پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ در تحقیق مرو و میچل [27] برخلاف نتایج سایر محققین و همچنین تحقیق حاضر است، زیرا انتظار می‌رود با افزایش دبی تمام پله‌ها زیر آب مستغرق شده و اثر زبری پله‌ها کمتر شود. این موضوع در تحقیق روشنگر و همکاران [28] و تحقیق حاضر مشهود است. بدین معنی که با افزایش دبی، از استهلاك انرژی نسبی کاسته می‌شود. تفاوت بین داده‌های موجود در شکل (۱۹) مربوط به شرایط مختلف آزمایشگاهی می‌باشد. به نظر می‌رسد که مطالعه بیشتری در این زمینه لازم خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

جریان روی سرریزهای پلکانی با پیچیدگی‌های زیادی همراه است که شامل شکل سه‌بعدی جریان، تلاطم زیاد، جریان دو فازی آب و هوا و استهلاك بالای انرژی می‌شود. از این رو، یک مطالعه



شکل ۱۸. تاثیر شیب بر استهلاك انرژی در سرریز با پلکان مختلف

Fig. 18. The effect of slope on energy dissipation in spillway with different steps

کاهش دبی، استهلاك انرژی را بیشتر می‌کند. در ضمن، عرض سرریز در تحقیق مرو و میچل ۲۹/۶ سانتی متر، ارتفاع سرریز ۲۵ سانتی متر و ارتفاع هر پلکان ۵ سانتی متر بوده است. به نظر می‌رسد با توجه به ابعاد کوچک مدل فیزیکی مورد استفاده در تحقیق مرو و میچل [27] و نیز دبی کم ایجاد شده روی سرریزهای پلکانی، اثر مقیاس می‌تواند بر افزایش استهلاك انرژی

نسبی در تحقیقات قبلی بالاتر بوده، که ناشی از دبی کمتر (۲ الی ۱۲ لیتر بر ثانیه) است. نتیجه‌گیری اولیه این تحقیق این است که با افزایش دبی، افت انرژی نسبی کاهش می‌یابد، و این موضوع در تحقیق حاضر و همچنین در تحقیق روشنگر و همکاران [27] تأیید شده است. بنابراین، انجام تحقیقات بیشتر برای درک بهتر رفتار استهلاك انرژی در شرایط مختلف آزمایشگاهی و بهبود طراحی سازه‌های هیدرولیکی امری ضروری است.

برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که اشکال مختلف پله مانند پله لبه‌دار، پله شیب‌دار و ... برای یافتن طرحی بهینه از نظر استهلاك انرژی و کمترین فشارهای منفی روی پله‌ها انجام شود. به دلیل ویژگی‌های خاص و پیچیده جریان‌های چرخشی، مطالعات آزمایشگاهی و عددی در خصوص تبادل میان جریان اصلی با این جریان‌ها مفید است. همچنین به دلیل استفاده از تعداد دبی کم در این تحقیق، پیشنهاد می‌شود برای بررسی بهتر پارامترها و رفتار هیدرولیکی جریان روی سرریزهای پلکانی، از تعداد دبی‌های بیشتری استفاده شود.

قدردانی

نویسندگان از حمایت معنوی دانشگاه تبریز، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی تشکر می‌کنند.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این مقاله در انتشار آن وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر سه نویسنده برابر است و برابر ۳۳/۳ درصد است.

منابع مالی

در این تحقیق، از شبیه‌سازی عددی استفاده شد و لذا از منابع مالی دانشگاه تبریز کمک گرفته نشد.

جامع در این زمینه ضروری است. عوامل متعددی بر رفتار این سرریزها تأثیرگذارند، و بررسی همه این پارامترها نیازمند زمان و منابع وسیع است. این تحقیق روی پارامترهای کلیدی مانند فشار، سرعت، درصد ورود هوا و استهلاك انرژی تمرکز کرده و به مطالعه عددی این ویژگی‌های در سرریزهای پلکانی پرداخته است. شبیه‌سازی عددی به شکل سه‌بعدی و جریان غیرماندگار انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که در صورت اعمال صحیح شرایط هندسی و مرزی، نرم‌افزار ANSYS می‌تواند جریان روی این سرریزها را به خوبی مدل‌سازی کند. برای شبیه‌سازی جریان روباز، از نرم‌افزار ANSYS و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استفاده شد و فرآیند حل تا رسیدن باقیمانده‌ها به مقدار 10^{-7} ادامه یافت. نوآوری اصلی این تحقیق در کاربرد مدل VOF برای تحلیل جریان و بررسی هوادهی است که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مدل به ارائه نتایج دقیق‌تر در خصوص پارامترهای مهم مانند توزیع فشار، سرعت و اختلاط فازهای سیال کمک می‌کند و بهبود عملکرد سازه‌های هیدرولیکی و طراحی بهینه آن‌ها را ممکن می‌سازد. بر اساس نتایج تحقیق، افزایش دبی منجر به کاهش استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی می‌شود؛ زیرا با افزایش دبی، عمق جریان افزایش می‌یابد و تأثیر زبری پله‌ها بر لایه‌های رویی جریان کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ارتفاع پله‌ها منجر به افزایش نرخ استهلاك انرژی و وقوع فشارهای منفی در سرریزها می‌شود. این وضعیت باعث افزایش سطح تماس بین جریان اصلی و گردابه‌ها و در پی آن افزایش ابعاد گردابه‌ها و شعاع چرخش می‌شود. افزایش تعداد پله‌ها نیز به کاهش استهلاك انرژی و فشار منفی کمک می‌کند، زیرا ابعاد پله‌ها و گردابه‌ها کوچک‌تر می‌شود. علاوه بر این، افزایش شیب سرریز در یک سرریز با ارتفاع ثابت، باعث کاهش نرخ استهلاك انرژی و افزایش احتمال فشار منفی می‌گردد. این تحقیق همچنین به مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های آزمایشگاهی سورنسن [15] پرداخته که هماهنگ خوبی با خطای حدود ۸ درصد را نشان می‌دهد. مقایسه بین نتایج تحقیق حاضر و مطالعات مرو و میچل [26] و گوند و همکاران [14] نشان می‌دهد که افت انرژی

29(6), pp. 809-819.

References

1. Felder, S. & Chanson, H. 2013. Aeration, flow instabilities, and residual energy on pooled stepped spillways of embankment dams. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(10), pp. 880-887.
2. Chanson, H., Yasuda, Y. & Ohtsu, I. 2002. Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(6), pp. 809-819.
3. Salmasi, F., Abraham, J. & Salmasi, A. 2021. Effect of stepped spillways on increasing dissolved oxygen in water, an experimental study. *Journal of Environmental Management*, 299, p. 113600.
4. Chanson, H. 1995. *Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways*. Oxford, UK: Pergamon.

5. Chanson, H. 1994. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 32(3), pp. 445-460.
6. Matos, J., Sanchez, M. A. R. T. Í., Quintela, A. & Dolz, J. 1999. Characteristic depth and pressure profiles in skimming flow over stepped spillways. In: *Congress IAHR* (Vol. 28).
7. Chanson, H. 1994. Stepped spillway flows and air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), pp. 422-435.
8. Chanson, H. & Toombes, L. 2002. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(1), pp. 145-156.
9. Malekzadeh, F, Salmasi, F, Abraham, J & Arvanaghi, H. 2022. Numerical investigation of the effect of geometric parameters on discharge coefficients for broad-crested weirs with sloped upstream and downstream faces. *Applied Water Science*, 12, p. 110.
10. Savage, B.M. & Johnson, M.C. 2001. Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study. *J Hydr Engin ASCE*, 127(8), pp. 640-649.
11. Sarkmarian, S. & Ahdian, J. 2019. Mathematical modeling of energy loss in stepped spillways using ANSYS-CFX numerical model. *Irrigation Science and Engineering*, 43(1), pp. 43-56. doi:10.22055/2017.22269.1593. (In Persian with English abstract).
12. Farooq, U., Li, S. & Yang, J. 2024. Numerical Analysis of Flow Characteristics and Energy Dissipation on Flat and Pooled Stepped Spillways. *Water*, 16(18), p. 2600.
13. Saqib, N. U. et al. 2022. Numerical analysis of pressure profiles and energy dissipation across stepped spillways having curved risers. *Applied Sciences*, 12(1), p. 448.
14. Guenther, P., Felder, S. & Chanson, H. 2013. Flow aeration, cavity processes and energy dissipation on flat and pooled stepped spillways for embankments. *Environ Fluid Mech*, 13, pp. 503-525.
15. Sorensen, R. M. 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), pp. 1461-1472.
16. Peyras, L. A., Royet, P. & Degoutte, G. 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), pp. 707-717.
17. Christodoulou, G.C. 1993. Energy dissipation on stepped spillways. *J. Hydr. Eng.*, 19(5), pp. 644-650.
18. Chamani, M.R. & Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *J. Hydr. Eng.*, 125(4), pp. 361-368.
19. Chinnarasri, C. & Wongwises, S. 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(1), pp. 70-76.
20. Salmasi, F. & Samadi, A. (2016). Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways. *Applied Water Science*, 8(229), pp. 1-11.
21. Chanson, H. 1996. Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. *Journal of Hydraulic Research*, 34(3), pp. 421-429.
22. Toombes, L., Wagner, C. & Chanson, H. 2008. Flow patterns in nappe flow regime down low gradient stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, 46(1), pp. 4-14.
23. Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F. & Shiri, J. 2017. Neural networks- and neuro-fuzzy-based determination of influential parameters on energy dissipation over stepped spillways under nappe flow regime. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(1), pp. 57-62.
24. Nourani, B., Arvanaghi, H. & Salmasi, F. 2021. Effects of different configurations of sloping crests and upstream and downstream ramps on the discharge coefficient for broad-crested weirs. *Journal of Hydrology*, 603, Part B, p. 126940.
25. Salmasi, F. & Abraham, J. 2022. Energy Loss at the Base of a Free Straight Drop Spillway. *Current Overview on Science and Technology Research*, 6, pp. 24-42.
26. Mero, S. & Mitchell, S. 2017. Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways. *Water and Environment Journal*, 31(1), pp. 127-137.
27. Salmasi, F. & Abraham, J. 2021. Genetic algorithms for optimizing stepped spillways to maximize energy dissipation. *Water Supply*, 22(2), p. 1255.
28. Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F. & Shiri, J. 2014. Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology*, 508, pp. 254-265.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Shokri Kaveh, M., Salmasi, F., Abbaspour, A. 2026. Numerical investigation of energy dissipation and flow aeration on flat stepped spillways, *Modares Civil Engineering journal*, 25(6), pp. 21-36.

DOI: 10.48311/mcej.2026.12718

